

**КЛАСИФІКАЦІЯ ДЕФЕКТІВ ТА ПОШКОДЖЕНЬ ВУЗЛІВ
СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ,
ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ ПІД ВПЛИВОМ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Колесніченко С.В., к.т.н., доцент,
Донбаська національна академія будівництва і архітектури
svk.mk15@gmail.com

Анотація. Не підставі теоретичних та експериментальних досліджень визначено коефіцієнти концентрації напружень локальних зон безфасоночних вузлів конструкцій з використанням широкополич двотаврів – ШПД (пояси) та гнuto-зварених замкнених профілів – ГЗП (решітка). Доведено, що недосконалість у вигляді ексцентриситету примикання решітки до поясу суттєво впливає на локальну концентрацію напружень та може сприяти ранньому розвитку тріщини втоми. Запропоновано його параметри для урахування як діагностичного дефекту подальшого визначення категорії технічного стану конструкції за результатами обстеження.

Ключові слова: дефекти, пошкодження, обстеження, динамічні навантаження, коефіцієнт концентрації напружень.

**КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ УЗЛОВ
СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ,
НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

Колесниченко С.В., к.т.н., доцент,
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
svk.mk15@gmail.com

Аннотация. На основе теоретических и экспериментальных исследований определены коэффициенты концентрации напряжений локальных зон бесфасоночных узлов конструкций с использованием широкополочных двутавров – ШПД (пояса) и гнuto-сварных замкнутых профилей – ГСП (решетка). Доказано, что несовершенство в виде эксцентриситета примыкания решетки к поясу серьезно влияет на локальную концентрацию напряжений и может способствовать раннему развитию усталостных трещин. Определены его параметры для учета как диагностического дефекта дальнейшего определения категории технического состояния конструкции по результатам обследования.

Ключевые слова: дефекты, повреждения, обследование, динамические нагрузки, коэффициент концентрации напряжений.

**CLASSIFICATION OF DAMAGES AND IMPERFECTIONS OF JOINTS IN STEEL
STRUCTURES UNDER DYNAMIC LOADING ACTION**

Kolesnichenko S., PhD., Associate Professor,
Donbas national academy of civil engineering and architecture
svk.mk15@gmail.com

Abstract. The places with a high level of stresses are the main reason of fatigue cracks appearance in joints of steel structures under dynamic loading. Modern normative classification tables in general have no numeric description of parameters affecting concentration. On the basis of

theoretical and experimental investigations of joints with H-beams (chord) and rectangular hollow sections – RHS (brace members) the local stress concentration factors are determined. The partial factors and their parametrical values and relationships have been established to determine the given factor's value. The most stressed places in the zones of a welded joint are determined for different types of joints with local reinforcement and without it. It is proposed to index all damages and imperfections of classification table as “resource” and “diagnostic” with the compulsory indication of danger for structures under dynamic action. It is proved that such imperfection as eccentricity of brace-to-chord connection may seriously influence local stress concentration and stimulate early development of fatigue cracks. The parameters of this diagnostic defect have been proposed for future determination of the technical condition category of the structure according to the technical investigation results.

Key words: damages, imperfections, technical investigations, dynamic loading, stress concentration factor.

Вступ (постановка проблеми). Практика обстеження, що склалася на сьогодні, переважним чином полягає в тому, що основним інструментом експерта – людини, що персонально відповідає за результат роботи – є аналіз дефектів і пошкоджень (ДП), які мають бути виявлені під час обстеження. На основі їхніх якісних та кількісних параметрів надалі потрібно визначити технічний стан будівлі/споруди (БС) та об'єкта в цілому. На сьогодні основним документом, де визначені кількісні значення ДП для сталевих конструкцій та вимоги для призначення технічного стану об'єкту є ДСТУ Б В.2.6–210:2016 [2], що розроблений на базі ДБН 362-92 та з урахуванням вимог «Нормативних документів...» [2]. Додаток В [1] має відповідну класифікаційну таблицю в якій ДП розподілені за 12 групами. Нажаль, ця класифікація не стала кращою порівняно з ДБН 362-92, тому що в ній залишилися всі попередні недоліки, а саме:

- для більшості ДП категорії надано не для усіх категорій – A_d , B_d та B_d ;
- не для всіх категорій наявні чисельні значення ДП.

Надалі, на підставі виявлених ДП, визначається технічний стан об'єкта в цілому, хоча він повинен визначатися тільки за граничними станами на підставі розрахунків, які вимагає ДБН В.2.6-168:2014 [3].

Основною причиною виникнення тріщини є процес втоми, який розпочинається з так званих «гарячих точок» – «hot spots» [4] – локальних зон з великою концентрацією напружень. Неврахування під час обстеження деяких параметрів вузлів можуть призвести до некоректних висновків за результатами розрахунків для визначення технічного стану та залишкового ресурсу.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблеми, що виникають під час обстеження конструкцій детально обговорені у [5, 6], для конструкцій під впливом динамічних навантажень – в роботах та працях М.І. Казакевича та В.В. Кулябка [7, 8]. В цих роботах вказувалось на необхідність теоретичних розрахунків на підставі дійсних натурних значень технічних та технологічних параметрів конструкцій.

Удосконалення кваліфікаційної таблиці ДП [2] для конструкцій під дією динамічних навантажень є окремою проблемою, яка потребує спеціальних наукових досліджень. У цій статті наведено тільки параметри для безфасоночних вузлів конструкцій ферм із широкополими двотаврами – ШПД (пояси) та гнuto-звареними замкненими профілями – ГЗП (решітка). Найбільше розповсюдження отримали конструкції, у яких елементи решітки безпосередньо примикають до елементів поясів за допомогою зварки. Типовими є з'єднання таких профілів з використанням Т, V, К та ТК – подібних вузлів. На перспективність використання такого типу рішень вказують дослідження та розробки Європейської асоціації з використання трубочастих профілів – CIDECT [9].

Європейський сортамент двотаврових профілів має велику номенклатуру, переважно ці профілі мають розвинені паралельні полиці – так звані широкополі двотаври – ШПД, що значно спрощує виконання зварних вузлів та дозволяє використовувати ці профілі практично

у всіх видах конструкцій. Нажаль, в Україні виробництво таких профілів не налагоджено й досі. З часів СРСР прокатні ШПД вироблялись тільки у Росії на Нижне-Тагільському металургійному комбінаті. Наразі вітчизняні заводи металевих конструкцій використовують або російські профілі, або аналогічні зварні. Але, до 2010 року в Україні виготовлено та експлуатується значна кількість конструкцій з використанням ШПД – переважно кроквяні ферми із решіткою з ГЗП, що виконані за типовим альбомом 1.460.3.15. Ці конструкції експлуатуються під значними навантаженнями, в тому числі динамічними.

Мета публікації. Враховуючи існуючу ситуацію, **метою цієї публікації** є надання теоретично та експериментально обґрунтованих даних щодо визначення граничних значень параметрів вищезазначених типів вузлів для внесення у кваліфікаційну таблицю ДП [2].

Результати досліджень. Основним фактором, що впливає на витривалість вузлів із ШПД та ГЗП є їхній складний НДС, що визначається існуванням зон із значним рівнем локальних напружень. Особливо важливим є знання цих зон с позиції розрахунків на витривалість – можливості появи тріщини втомі. Концентрація напружень характеризується відповідним коефіцієнтом концентрації напружень – ККН, або SCF (stress concentration factor – у вимогах СІДЕСТ та Єврокодів [9, 10]) – α_σ , який вказує в скільки разів рівень локальних напружень σ_{loc} більше нормативних σ_{norm} , що визначені звичайними методами будівельної механіки та теорії пружності для основного перерізу елемента.

Таким чином, напруження, які діють у місцях концентрації, визначаються за формулою:

$$\sigma_{loc} = \sigma_{norm} \cdot \alpha_\sigma \quad (1)$$

Саме це напруження має бути прийнято за σ_{cm} – найбільше за абсолютним значенням статичне напруження у розрахунковому перерізі у формулі (15.2) ДБН [3] розділу 15 для розрахунків на витривалість.

Загальний порядок визначення коефіцієнтів концентрації напружень α_σ для усіх типів вузлів наступний:

1. Визначаються (теоретичні розрахунки) або заміряються (результати обстеження для подальших теоретичних розрахунків) геометричні розміри елементів вузла.
2. Окремо для поясу і розкосів за параметричними формулами визначаються теоретичні коефіцієнти концентрації напружень α_σ^{geom} .
3. Остаточні коефіцієнти концентрації напружень визначаються:

$$\alpha_\sigma = \alpha_\sigma^{geom} \cdot K(\beta) \cdot K(e) \cdot \gamma_\alpha \quad (2)$$

де α_σ^{geom} – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, визначений за геометрією вузла;

$K(\beta)$ – коефіцієнт, який враховує вплив кута нахилу розкоса на концентрацію напружень. Для Т-подібних вузлів $K(\beta) = 1$;

$K(e)$ – коефіцієнт, який враховує вплив зміщення решітки (в мм) на концентрацію напружень. Визначається на підставі результатів обстеження;

γ_α – коефіцієнт концентрації напружень, що враховує різницю між теоретичним та реальним значенням.

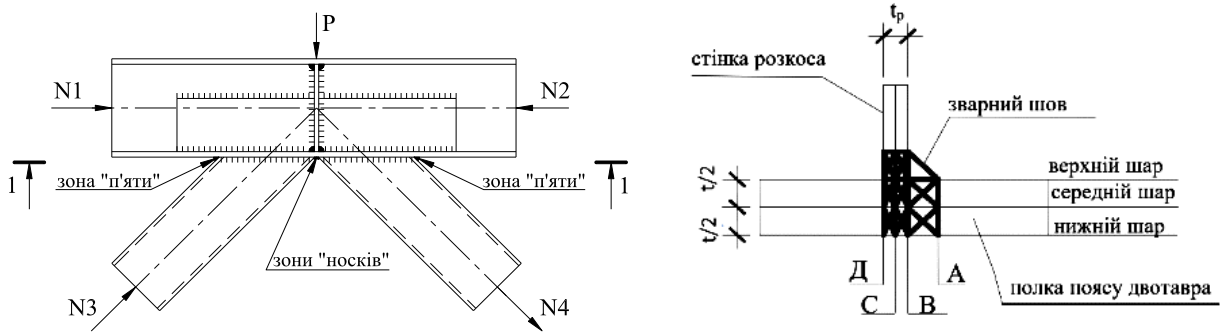
4. Для кожного елемента вузла окремо виконується розрахунок локальних геометричних напружень за формулою (1).

З метою визначення всіх теоретичних значень коефіцієнтів на НДС вузлів, було виконано їх чисельні розрахунки. Моделі було розроблено на підставі МКЕ, що реалізовані у програмному комплексі SCAD Office в пружній стадії роботи матеріалу. За базові приймалися вузли без ексцентриситетів ($e = 0$ мм), але з різним конструктивним оформленням – з підкріплюючими планками або без них. Детально визначення НДС та описи розрахункових схем і експериментальних досліджень надано у роботах [11-13].

Коефіцієнти концентрації напружень у небезпечних зонах визначалися за формулою:

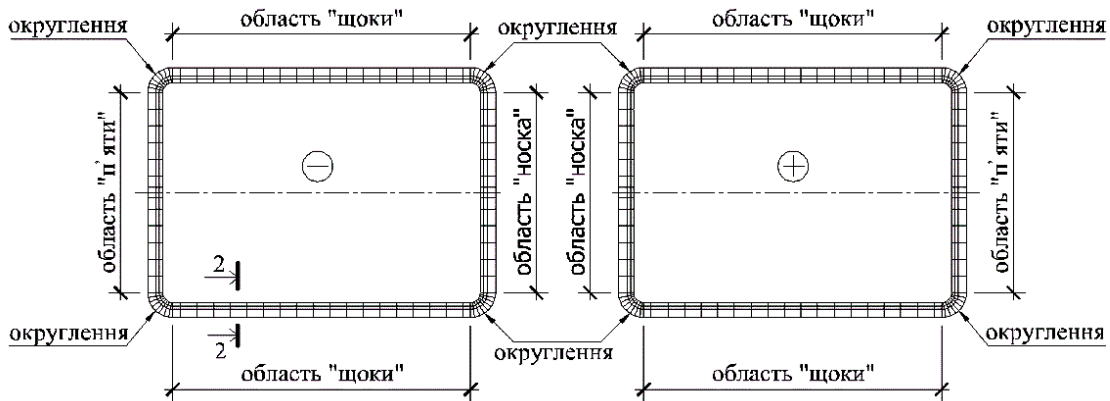
$$\alpha_\sigma^{geom} = \sigma_{екв}^{IV} / \sigma_{ном}, \quad (3)$$

де $\sigma_{екв}^V$ і $\sigma_{ном}$ – відповідно еквівалентні і номінальні напруження (відрізняються від нормативних $\sigma_{ном}$ тим, що розраховується з урахуванням зварного шва при плоскому напруженому стані) у небезпечній зоні. Загальні схеми для розрахунку К-подібного вузла надані на рис. 1.



а) загальна сзема К-подібного вузла

б) схема зонування зварного шва



в) найменування зон К-подібного вузла

Рис. 1. Визначення зон зварного шва

На підставі виконаних теоретичних розрахунків моделей вузлів було визначено:

- значення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень $\alpha_{\sigma}^{геом}$ (таблиця 1);
- теоретичні залежності коефіцієнта концентрації напружень $K(\beta)$ в елементах К – подібного вузла від кутів нахилу β (зведено в таблицю 2);
- залежності змінення теоретичного коефіцієнта концентрації $K(e)$, що враховують ексцентриситет примикання елементів решітки до поясів (таблиця 3).

Таблиця 1 – Визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень $\alpha_{\sigma}^{геом}$ для К-подібного вузла

Тип вузла	Елемент	Залежність	
		Вузли без похилих планок	Вузли із похилими планками
К - подібний	Пояс	$\alpha_{\sigma}^{геом} = 8,363 \exp \left[-0,9489 \cdot \left(\frac{d}{D} \right) \right]$	$\alpha_{\sigma}^{геом} = 4,97 \exp \left[-1,157 \cdot \left(\frac{d}{D} \right) \right]$
	Розкоси	$\alpha_{\sigma}^{геом} = 10,493 \cdot \left(\frac{t}{t_p} \right)^{-1,1658}$	$\alpha_{\sigma}^{геом} = 2,87 \cdot \left(\frac{t}{t_p} \right)^{-0,7017}$

Позначення: D – ширина полиці двотавра поясу; t – товщина полиці двотавра поясу; t_p – товщина стінки решітки; d – ширина відповідного елемента решітки

Таблиця 2 – Залежності коефіцієнту концентрації напружень $K(\beta)$ в елементах К – подібного вузла від кутів нахилу β (для розтягнутого розкоса)

Елемент	Місцезнаходження	Залежність
«+» розкос	«Носок»	$K(\beta) = -0,00008 \cdot \beta^2 + 0,009 \cdot \beta + 0,7539$
	«П'ята»	$K(\beta) = 0,4815 \cdot \ln(\beta) - 0,8731$

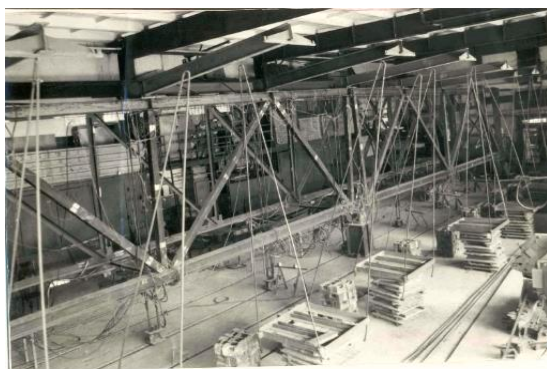
Примітка: кут β – в градусах; при $\beta = 45^\circ - K(\beta) = 1,0$.

Таблиця 3 – Залежності теоретичного коефіцієнту концентрації напружень $K(e)$ від величини ексцентриситету (зміщення) решітки з площини вузла – e

Тип	Елемент вузла	Зонування	Залежність
К	«-» розкос	«П'ята»	$K(e) = 0,0002 \cdot e^2 - 0,0012 \cdot e + 0,9919$
		«Носок»	$K(e) = 0,0006 \cdot e^2 + 0,0255 \cdot e + 0,998$
	«+» розкос	«П'ята»	$K(e) = 0,0009 \cdot e^2 - 0,0024 \cdot e + 0,9996$
		«Носок»	$K(e) = 0,0006 \cdot e^2 + 0,0006 \cdot e + 1,0051$

Примітка: величина e – в мм; при $e = 0$ мм - $K(e) = 1,0$.

Отримані теоретичні дані для α_{σ}^{geom} було перевірено практично під час експериментальних досліджень натурних моделей кроквяних ферм прогоном 24 метри (рис. 2).



а) загальний вигляд моделі ферми прогоном 24 метри



б) загальний вигляд К-подібного вузла без підкріплення похилими планками

Рис. 2. Фрагменти експериментальних досліджень ферм та вузлів

На підставі експериментів були відкориговані теоретичні значення α_{σ}^{geom} . Коригування відбулося шляхом введення додаткового поправочного коефіцієнту

$$\gamma_{\alpha} = \frac{\alpha_{\sigma,екс}^{geom}}{\alpha_{\sigma}^{geom}}, \quad (4)$$

де $\alpha_{\sigma,екс}^{geom}$ – значення коефіцієнта концентрації напружень, що визначено експериментально.

Для виконання розрахунків, рекомендовано приймати поправочний коефіцієнт $\gamma_{\alpha} = 1.2$.

Одним із чинників зростання коефіцієнта концентрації напружень α_{σ}^{geom} вузлів типу «ШПД+ГЗП» є можливе їх виконання із ексцентриситетом приєднання решітки до поясу. У зв'язку з тим, що цей ексцентриситет не враховується під час розрахунків та проектування, реальний НДС вузла може бути значно більший теоретичного.

Кількісне значення $K(e)$, та α_{σ} в цілому, може бути розраховане тільки на підставі обмірів конструкції та визначення ексцентриситетів e під час виконання робіт з обстеження.

У якості прикладу, для реальних К-подібного вузла, у таблиці 4 наведено розрахунки коефіцієнтів, що складають формулу 2.

Таблиця 4 – Приклади розрахунків коефіцієнту α_σ К-подібного вузла типу «ШПД+ГЗП»

α_σ	α_σ^{geom}	e, мм	$K(\beta)$		γ_α	розкос	зона	$K(e)$
			$\alpha=40^\circ$	$\alpha=50^\circ$				
1,82...8,1	1,98...5,7	10	0,9	1,1	1,2	«+»	«п'ята»	0,85
						розтягнутий	«носок»	1,07
						«-»	«п'ята»	1,03
						стиснутий	«носок»	1,08
1,88...9,69	1,98...5,7	20	0,9	1,1	1,2	«+»	«п'ята»	0,88
						розтягнутий	«носок»	1,26
						«-»	«п'ята»	1,1
						стиснутий	«носок»	1,29

Аналіз таблиці 4 показує наступне:

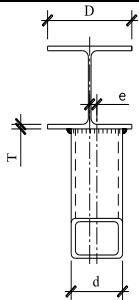
– у вузлах існують локальні зони, концентрація напружень в яких може перевищувати нормативні у 9,69 разів. Не урахування цієї особливості для конструкцій, що працюють під впливом динамічних навантажень може призвести до ранньої появи тріщини втомі.

– наявність ексцентриситету e, який фактично є недосконалістю конструкції на стадії виготовлення, може збільшити локальну концентрацію напружень вузла майже на 30%. Цей факт вказує на необхідність урахування цього можливого дефекту під час перевірних розрахунків за результатами обстеження для подальшого визначення технічного стану.

Для можливості подальшого розрахунку значень НДС елементів конструкції за граничним станом та визначення на підставі цього залишкового ресурсу та категорії технічного стану конструкції (будівлі, споруди в цілому), пропонується індексувати всі ДП за двома типами, перші – ресурсні – «Р» – ДП, що на пряму пов'язані із визначенням граничного стану. До цих ДП відносяться тріщини (1-й граничний стан), переміщення конструкції (2-й граничний стан). Всі інші індексуються як діагностичні – «Д», тобто ДП, значення яких мають бути враховані під час обов'язкових перевірних розрахунків, що виконуються на підставі обстеження. Крім того, у найменуванні ДП потрібно чітко вказувати його важливість для конструкцій, що експлуатуються під впливом динамічних навантажень з позиції розрахунків циклів для визначення терміну можливої появи втомної тріщини.

Встановлені граничні значення $K(e)$ пропонуються до внесення у таблицю ДП [1] та визначити як діагностичні показники – індекс «Д». На підставі вищезазначеного, у таблиці 5 надано пропозиції щодо урахування ексцентриситетів вузлів типу «ШПД+ГЗП» для подальшої оцінки технічного стану конструкції.

Таблиця 5 – Приклад недосконалості з параметричним описом категорії ДП та її індексом

Індекс	Найменування ДП	Ескіз	Опис	Параметри	Категорія
Д	Зміщення елементів в вузлах		e – величина ексцентриситету, мм	$e \geq 15$ мм	А
	Динамічні навантаження			$5 < e \leq 15$ мм	Б
				$0 < e \leq 5$ мм	В

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Для вузлів сталевих конструкцій типу «ШПД + ГЗП» уточнені коефіцієнти концентрації напружень α_σ для визначення НДС, що дозволяє оцінити їхній вплив для розрахунків появи втомної тріщини. Для зазначених типів вузлів визначено зростання α_σ

в залежності від ексцентриситету примикання елементів решітки до поясу.

2. Ексцентриситет примикання запропоновано враховувати як недосконалість для внесення у відповідну таблицю дефектів та пошкоджень ДСТУ Б В.2.6–210:2016. Цей дефект рекомендовано індексувати як діагностичний для подальших розрахунків визначення граничного стану конструкцій, що працюють під динамічними навантаженнями.

3. Встановлені граничні параметри ексцентриситету примикання для визначення категорії небезпеки дефекту.

Література

1. ДСТУ Б В.2.6–210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. – Київ, 2016. – 80 с.

2. Нормативные документы по вопросам обследования, паспортизации, безопасной и надежной эксплуатации производственных зданий и сооружений / Государственный комитет строительства, архитектуры и жилищной политики Украины, Держнаглядохоронпраці України. – К., 1997. – 137с.

3. ДБН В.2.6-168:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – К., 2014. – 199 с.

4. Wingerde A.M. New guidelines for fatigue design of HSS connections / A.M. Wingerde, J.A. Packer, J. Wardenier // Journal of structural engineering, 1996. – P. 125-132.

5. Шимановский А.В. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений / А.В. Шимановский, В.Н. Гордеев, В.П. Королев, А.И. Оглобля, И.Р. Рухович, Ю.В. Филатов. – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 463 с.

6. Шимановский А.В. Подготовка и проведение обследований металлических конструкций / А.В. Шимановский // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського, 2016. – Вип. 17. – С. 4-14.

7. Кулябко В.В. Динамическая паспортизация и диагностика технического состояния зданий с новым виброактивным технологическим оборудованием / В.В. Кулябко, Е.М. Ермак, А.О. Исмагилов, А.В. Масловский // Промислове будівництво та інженерні споруди. – К.: 2008. – Вип. 1. – С. 10-18.

8. Казакевич М.И. Динамическая диагностика и мониторинг состояния строительных конструкций ответственных сооружений / М.И. Казакевич, В.В. Кулябко // Труды IV-й украинской научно-технической конференции «Металлические конструкции». – Киев-Николаев, 1996. – С. 84-85.

9. Wardenier J. Construire avec des profils creux en acier. Guide de dimensionnement. Utilisation de profils creux de construction dans les applications mecaniques / J. Wardenier, D. Dutta, N. Yeomans, J. Packer, O. Bucak. – CIDECT, Koln: Verl. TUV. Rheinland, 1996. – 159 p.

10. Eurocode 3: ENV 1993-1-1, Part 1.1, Design of Steel Structures, CEN, Brussels, 1992.

11. Колесниченко С.В. Исследование напряженно-деформированного состояния и концентрации напряжений в К-образных узлах плоских решетчатых конструкций / С.В. Колесниченко, А.Н. Миронов // Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення. «Автомобільні дороги і транспортне будівництво. – Київ, 2002. – Вип. 64. – С. 127-130.

12. Колесниченко С.В. Определение теоретического коэффициента концентрации напряжений в сварных бесфасоночных узлах плоских стержневых конструкций с использованием широкополочных двутавров и гнутосварных замкнутых профилей / С.В. Колесниченко, А.Н. Миронов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2003. – № 10-11. – С. 62-69.

13. Колесниченко С.В. Напряженно-деформированное состояние сварных бесфасоночных узлов с использованием широкополочных двутавров и гнутосварных замкнутых профилей / С.В. Колесниченко, А.Н. Миронов // Вісник ДонДАБА, 2003. – Вип. 2(39). – Том 1. – С. 107-115.

Стаття надійшла 1.05.2018